

KINETICS OF ANAEROBIC BIODEGRADATION OF SLURRY OF COMPOST IN LIQUID WASTE OF TOFU ON BATCH PROCESS

Margono¹, Hary Sulisty², Sumardi²

ABSTRACT

This research was to study the effects of reaction temperature and reactant ratio on the production rate of biogas and the kinetics of cell growth and substrate consumption. This study was carried out on laboratory scale, batch reactor, anaerobic process, and cow dung as starter. The temperature effects was studied in mesophilic phase between 30 °C to 45 °C and the reactant ratio was between 0.4 to 0.4556 g compost per mL liquid waste of tofu industry.

The result of the experiment showed that the maximum production rate of biogas was reached when the reaction temperature 40 °C and the reactant ratio 0.4444 g compost per mL liquid waste of tofu industry. Also, for this condition the maximum specific growth rate of the cell was 0.0044 hour⁻¹. The effects of the reaction temperature on the maximum specific growth rate fitted the equation of $\mu_m/\mu_{m1} = 1.0789^{(T2-T1)}$ and the average relative errors 1.61%.

PENGANTAR

Gas bio merupakan produk fase gas dari peristiwa biodegradasi bahan organik yang berlangsung secara anaerobik. Gas bio dimanfaatkan sebagai sumber energi karena salah satu komponen di dalamnya adalah gas metan. Bahan organik yang dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan gas bio antara lain kompos dan limbah cair tahu. Limbah cair tahu banyak dihasilkan oleh industri tahu dan masih mengandung cukup nutrisi untuk pertumbuhan mikroorganisme.

Sampah padat mengandung senyawa-senyawa selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Jenis bakteri pendekomposisi selulosa secara anaerobik adalah kelompok genus *clostridium*. Jenis bakteri ini banyak ditemukan dalam tanah, kompos, kotoran hewan, dan lumpur sungai (Alexander, 1977). Ke-Xin dan Guang-Qian (Emejuiwe dkk., 1981) telah membuktikan bahwa sampah organik yang sudah membusuk (kompos) memiliki kecepatan pembentukan gas bio lebih cepat dibanding sampah organik segar. Disamping itu di dalam kompos terdapat makronutrien (nitrogen dan fosfor) dan mikronutrien yang terdiri atas besi dan nikel (1 – 5 bpi) dan Se (sekitar 0,05 bpi).

Lyamchai dan Bhatia (Emejuiwe dkk., 1981) menyatakan bahwa dalam proses produksi gas bio dari bahan kompos tidak diperlukan lagi tambahan pupuk kimia. Formula empiris rata-rata bakteri anaerobik adalah $C_5H_7O_2NP_{0,06}$ (Palmisano dan Barlaz, 1996). Sedangkan menurut Bailey dan Ollis (1986) berat rata-rata 1 sel bakteri adalah $\pm 10^{-12}$ g.

Fermentasi pembentukan gas metan relatif konstan pada kisaran pH 6 - 8,5 (Benefield dan Randall, 1980). Alkalinitas bikarbonat yang terbentuk dari CO_2 merupakan buffer utama untuk mengontrol pH operasi. Senyawa-senyawa yang berpotensi menjadi penghambat atau racun bagi proses umumnya tidak ditemukan pada sampah kota dan limbah cair tahu.

Proses biodegradasi dalam penelitian ini berlangsung secara batch dan menggunakan model pertumbuhan tak berstruktur serta diambil asumsi-asumsi bahwa substrat yang digunakan dianggap substrat tunggal dan pertumbuhan biomassa yang teramati merupakan pertumbuhan neto (*net growth*) total untuk semua jenis bakteri. Laju pertumbuhan sel ditulis dalam persamaan:

$$r_x = \frac{dx}{dt} = \mu x \quad (1)$$

Hubungan μ dengan konsentrasi substrat ataupun konsentrasi sel ditunjukkan oleh model pertumbuhan sel seperti berikut (Brauer, 1985) :

$$\text{Model Monod : } \mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad (2)$$

$$\text{Model Teissier : } \mu = \mu_m \left(1 - e^{-\frac{S}{K_s}}\right) \quad (3)$$

$$\text{Model Contois Fujimoto: } \mu = \mu_m \frac{S}{K_s X + S} \quad (4)$$

Konsumsi substrat digunakan untuk pertumbuhan sel, pemeliharaan sel dan pembentukan produk atau dapat ditulis dalam persamaan:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y_{x/s}} \left(\frac{dX}{dt}\right) + mX + \frac{1}{Y_{p/s}} \left(\frac{dP}{dt}\right) \quad (5)$$

Dalam praktek, sulit dipisahkan antara $Y_{x/s}$ dan $Y_{p/s}$ maupun konsumsi substrat untuk pemeliharaan sehingga persamaan (5) disederhanakan:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y_{obs}} \left(\frac{dX}{dt}\right) \quad (6)$$

Pengaruh suhu reaksi terhadap laju pertumbuhan spesifik maksimum dianalogikan dengan persamaan Arrhenius dan diperoleh persamaan seperti berikut:

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = \Theta (T_2 - T_1) \quad (7)$$

dengan,

$$\Theta = \exp \left(\frac{E}{R} \frac{1}{T_2 T_1} \right) = \text{konstante}$$

Persamaan (1) dan (6) diselesaikan secara grafis dengan bantuan program komputer *Microsoft Excel 97* sehingga didapat nilai μ_m dan Y_{obs} . Ks dihitung dengan metode jumlah kuadrat kesalahan terkecil (*sum square of error / SSE*).

$$SSE = \sum (S_{data} - S_{hitung})^2 + \sum [(X_{data} - X_{hitung})K]^2 \dots\dots\dots(8)$$

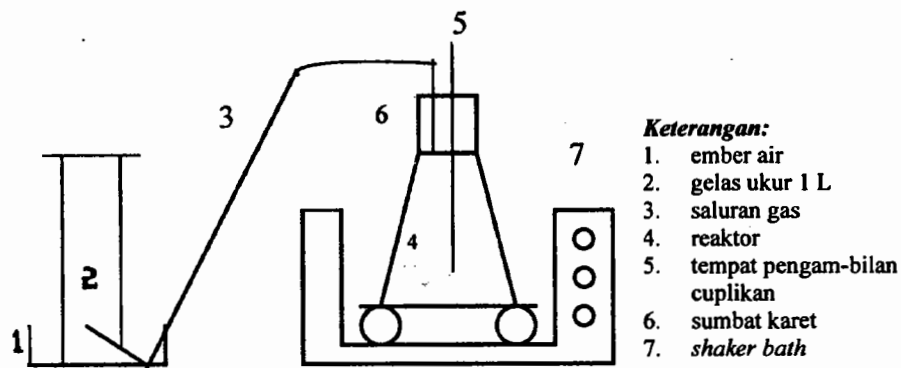
Konstante Θ pada persamaan (7) dihitung menggunakan metode *Newton Raphson* dengan fungsi:

$$F = \sum (\mu_{2,data} - \mu_{2,hitung}) = 0 \dots\dots\dots(9)$$

CARA PENELITIAN

Bahan yang digunakan berupa kompos sampah sayur dengan kandungan N = 6,1 mg/g kompos dan P = 15,5 mg/g kompos, air kecutan tahu dengan pH = 3,8 – 4, BOD₅ = 1300 mg/L, kandungan N = 331,3 mg/L dan P = 73,976 mg/L, kotoran sapi, NaOH 1 N, HCl 30%, KOH 46%, PCA, *pepton water*, dan EM-4.

Alat penelitian terdiri atas *shaker bath*, reaktor batch yang terbuat dari erlenmeyer 1 L, dan alat ukur volume gas yang terbuat dari gelas ukur 1 L. Susunan alat penelitian selengkapnya dapat dilihat pada gambar 1.



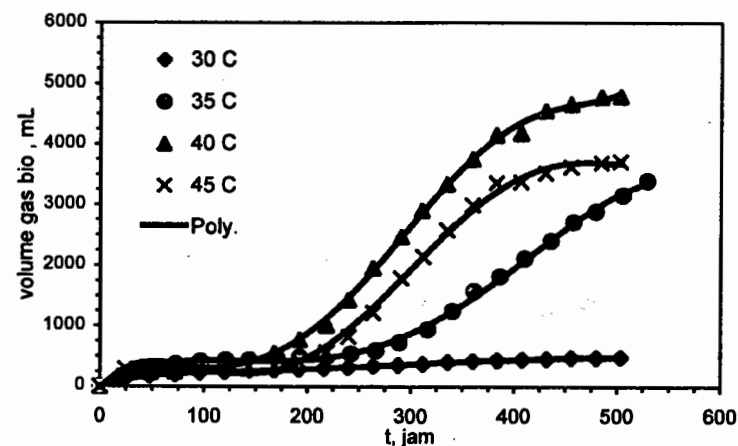
Gambar 1. Susunan alat penelitian

Sampah sayur dipotong-potong dengan panjang ± 5 cm kemudian dibuat kompos dengan bahan pembantu EM-4 selama 5 hari. Kompos dan limbah cair tahu disimpan di ruang dingin bersuhu ± 4 °C dan siap digunakan untuk percobaan.

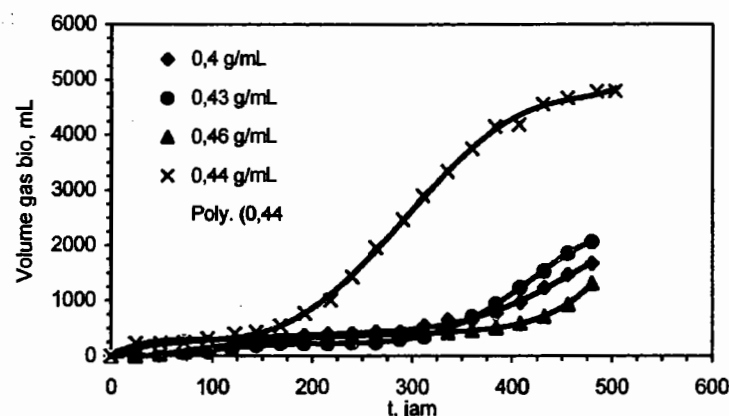
Kompos seberat 200 g dan limbah cair tahu 450 mL dicampur, kemudian diblender selama ± 2 menit sehingga berbentuk *slurry*. Kemudian ditambahkan kotoran sapi ke dalam *slurry* sejumlah 70 g (10%) dan diaduk sehingga rata. pH *slurry* diatur dengan ditambah NaOH 1N sehingga pH ± 7 . Selanjutnya *slurry* dimasukkan ke dalam reaktor. Gas N₂ dihisap ke dalam reaktor sampai udara terusir dari dalam reaktor dan digantikan oleh gas N₂. Alat dirangkai seperti gambar 1. *Shaker bath* diaktifkan pada goyangan 70 kali per menit dan suhu sesuai kondisi operasi yang diinginkan, yaitu 30, 35, 40, dan 45 °C untuk masing-masing percobaan. Sehari sekali *shaker bath* dimatikan selama ± 3 jam. Cuplikan sejumlah 2 ml diambil secara berkala dan dilakukan analisis BOD₅ dan TPC. Produksi gas dicatat sekali setiap hari, pH *slurry* diukur secara berkala dan dikontrol secara manual dengan menambahkan larutan HCL 30% atau NaOH 1 N sehingga pH selalu ada di antara 6 – 8. Percobaan seperti ini dilakukan selama 20 – 21 hari. Percobaan yang sama dilakukan untuk variabel perbandingan pereaksi dan dilakukan pada suhu 40°C.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Produksi gas bio kumulatif tertinggi terjadi pada suhu reaksi 40°C dan perbandingan pereaksi 0,44 g kompos per mL limbah cair tahu seperti terlihat pada gambar 2 dan 3. Konsentrasi gas metan diukur pada percobaan dengan suhu reaksi 35°C dan mencapai maksimum 36,35 % v/v pada hari ke-18, sedangkan pada suhu reaksi 40°C konsentrasi gas metan maksimum 35,92 % v/v dan terjadi pada hari ke-22.



Gambar 2. Volume gas bio sebagai fungsi waktu dan suhu reaksi



Gambar 3. Volume gas bio sebagai fungsi waktu dan perbandingan pereaksi

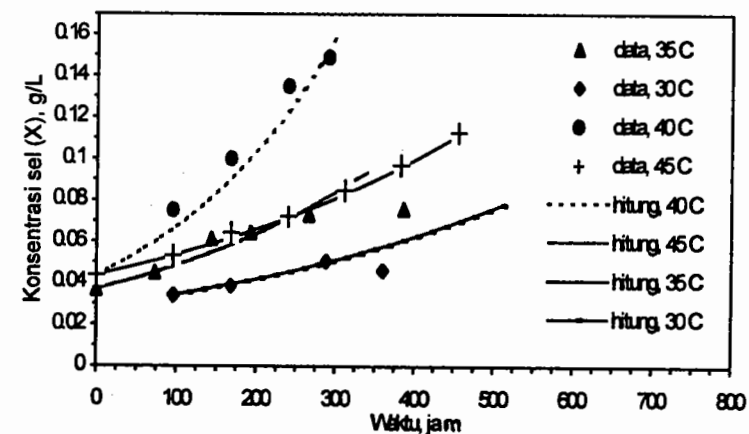
Hasil perhitungan konstante laju pertumbuhan spesifik maksimum (μ_m) dan yield teramati (Yobs) untuk berbagai suhu reaksi dapat dilihat dalam daftar I.

Daftar I. Hubungan μ_m dan Yobs terhadap suhu reaksi.

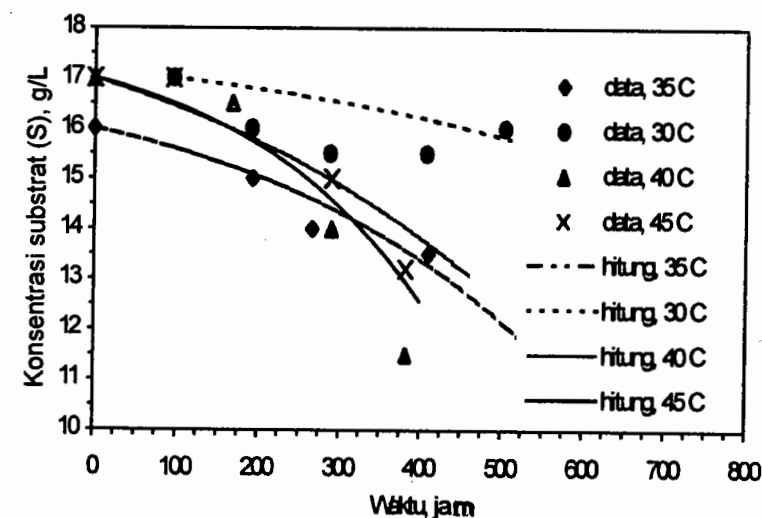
Suhu °C	μ_m , 1/jam	Yobs g sel/g substrat
30	0,0020	0,0361
35	0,0028	0,0283
40	0,0044	0,0352
45	0,0021	0,0176

Dari daftar I bisa kita simpulkan bahwa suhu reaksi optimum dimana bakteri mengalami laju pertumbuhan spesifik maksimum (μ_m) paling tinggi tercapai pada suhu 40°C. Menurut Hartz et al. (Palmisano dan Barlaz, 1996) suhu optimum untuk produksi metan pada fase mesofilik adalah 41°C, sedangkan menurut Pfeffer (Palmisano dan Barlaz, 1996) suhu 42°C. Mata-Alvarez dan Martinex Vituria (Palmisano dan Barlaz, 1996) meneliti bahwa produksi metan maksimum terjadi pada suhu 42°C walaupun produksi metan kumulatif tertinggi terjadi pada suhu 34 – 38°C.

Nilai X dan S hasil perhitungan didasarkan pada model pertumbuhan Monod, sedangkan berdasarkan model pertumbuhan lain tidak digambar karena nilainya berimpit dengan hasil perhitungan model Monod. Dengan demikian, laju pertumbuhan spesifik sebagai fungsi substrat dapat didekati dengan 3 model pertumbuhan di atas yaitu model Monod, Teissier, atau Contois-Fujimoto.



Gambar 4. Konsentrasi sel (X) sebagai fungsi waktu dan suhu reaksi



Gambar 5. Konsentrasi substrat sebagai fungsi waktu dan suhu reaksi

Dalam gambar 4 terlihat bahwa ada perbedaan yang cukup besar antara nilai X hasil percobaan dengan hasil perhitungan, hal ini dimungkinkan karena asumsi-asumsi yang diambil, antara lain substrat dianggap substrat tunggal dan mikroorganisme dihitung secara keseluruhan. Demikian juga dalam gambar 5, terlihat bahwa penyimpangan nilai konsentrasi substrat (S) hasil perhitungan dengan data percobaan cukup besar. Hal ini diperkirakan karena penggunaan ukuran BOD 5 hari belum cukup untuk mewakili semua zat organik yang dapat didegradasi dalam *slurry* karena adanya bahan organik padat yang mungkin membutuhkan waktu degradasi yang lebih lama.

menghasilkan faktor kesalahan pada nilai kandungan substrat yang sesungguhnya. Faktor kesalahan dapat ditekan menjadi lebih kecil dengan menggunakan ukuran *ultimate BOD*.

Daftar II. Hubungan Konstanta Ks Terhadap Suhu Reaksi

Suhu, °C	Ks, g/L	Ralat rata-rata, %
Model Pertumbuhan Monod		
30	0,0011	10,58
35	0,2795	12,48
40	0,3734	7,87
45	0,3277	4,00
Model Pertumbuhan Teissier		
30	1,3377	10,58
35	3,5565	12,52
40	4,0088	7,82
45	4,0117	3,92
Model Pertumbuhan Contois-Fujimoto		
30	0,0064	10,58
35	2,9194	12,53
40	3,083	7,73
45	4,9748	3,92

Hubungan laju pertumbuhan spesifik maksimum dengan suhu reaksi yang ditunjukkan oleh persamaan (7) hanya berlaku dari suhu 30 – 40°C. Dengan menggunakan data μ_m dalam daftar I diperoleh $\Theta = 1,0789$.

Pengaruh perbandingan berat kompos per volume limbah cair tahu dipelajari pada suhu reaksi 40°C dan kecepatan goyangan *shaker bath* 70 kali per menit. Kisaran perbandingan pereaksi diambil berdasarkan percobaan pendahuluan yaitu antara 0,4 g kompos per mL limbah cair tahu sampai dengan 0,46 g kompos per mL limbah cair tahu.

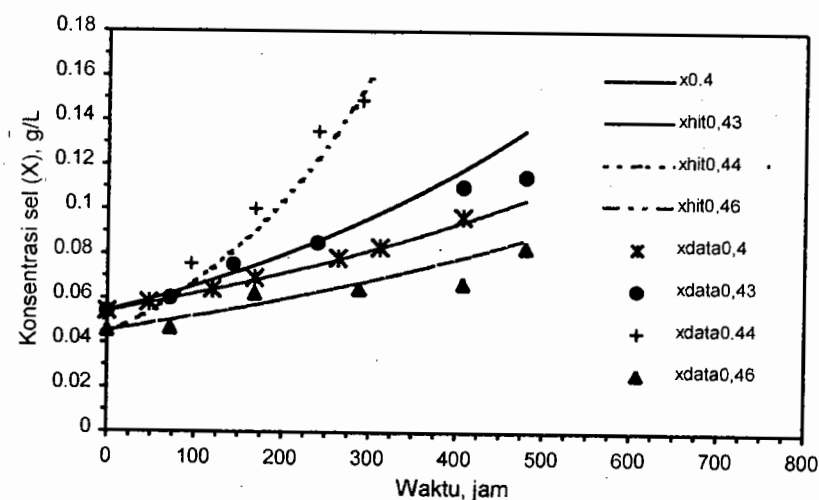
Daftar III. Hubungan μ_m dan Yobs terhadap perbandingan pereaksi

Perbandingan pereaksi g kompos/mL limbah	μ_m 1/jam	Yobs g sel/g substrat
0,4	0,0014	0,017
0,43	0,002	0,064
0,44	0,0044	0,0352
0,46	0,0014	0,0297

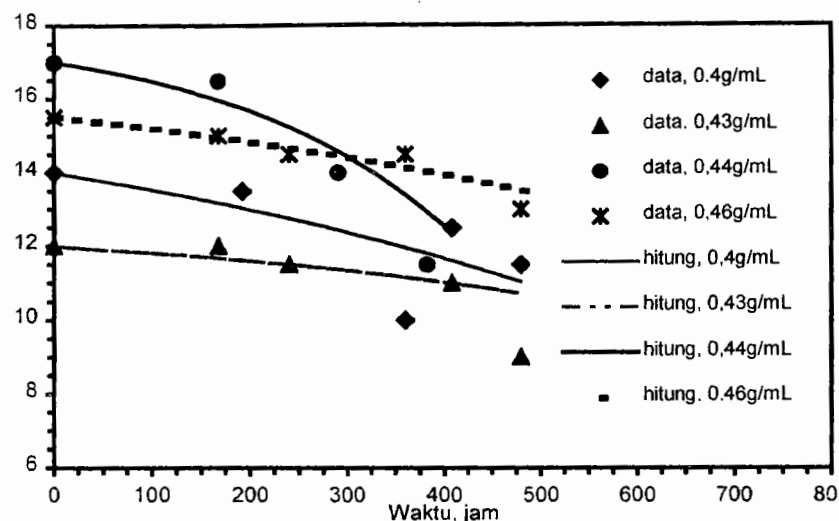
Daftar IV. Hubungan Konstanta Ks Terhadap Perbandingan Pereaksi

Perbandingan pereaksi	Ks g/L	Ralat rata-rata, %
Model Pertumbuhan Monod		
0,4	0,2498	7,61
0,43	0,4895	9,98
0,44	0,3734	7,87
0,46	0,5740	8,64
Model Pertumbuhan Teissier		
0,4	3,3594	7,60
0,43	0,6436	11,58
0,44	4,0088	7,82
0,46	4,4393	8,68
Model Pertumbuhan Contois-Fujimoto		
0,4	1,9997	7,52
0,43	0,8973	11,32
0,44	3,083	7,73
0,46	4,9977	9,09

Nilai μ_m maksimum dicapai pada perbandingan pereaksi 0,44 g kompos per mL limbah cair tahu seperti terlihat dalam daftar III. Penyimpangan nilai X dan S, antara hasil percobaan dan hasil perhitungan, cukup besar dan hal ini kemungkinan karena alasan yang sama sebagaimana telah dijelaskan pada gambar 4 dan gambar 5.



Gambar 6. Konsentrasi sel sebagai fungsi waktu dan perbandingan pereaksi



Gambar 7. Konsentrasi substrat sebagai fungsi waktu dan perbandingan pereaksi

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan maka dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Laju produksi gas bio tertinggi dan laju pertumbuhan spesifik maksimum tertinggi dicapai pada suhu reaksi 40 °C dan perbandingan pereaksi 0,4444 g kompos per mL limbah cair tahu.
2. Laju pertumbuhan spesifik maksimum (μ_m) fungsi suhu (T_1 dan T_2) pada kisaran suhu 30 – 40°C dapat didekati dengan persamaan:

$$\frac{\mu_{m2}}{\mu_{m1}} = 1,0789^{(T_2 - T_1)}$$

3. Persamaan Monod lebih sederhana dan umum digunakan sehingga pendekatan hubungan μ dengan S lebih baik menggunakan persamaan Monod, yaitu:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S}$$

K_s = tetapan kejenuhan, yaitu konsentrasi substrat pada saat $\mu = 0,5 \mu_m$

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada bapak Prof. Dr. Ir. Ida Bagus Agra dan bapak Ir. Moh. Fahrurrozi, M.Sc., Ph.D. atas saran-sarannya. Ucapan terima kasih juga kepada tim Laboratorium Mikrobiologi, Pusat Studi Pangan dan Gizi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, yang telah banyak membantu terselesaikannya penelitian dan penulisan naskah ini.

DAFTAR DAN ARTI LAMBANG

BOD ₅	: nilai BOD diinkubasi selama 5 hari, g/L
E	: energi aktivasi, kal./mol
k	: konstante kecepatan reaksi
K _s	: konstante kejenuhan, g/L
m	: koefisien pemeliharaan, 1/jam
r _x	: laju pertumbuhan sel, g/L
R	: konstante gas ideal, kal/mol.K
S	: konsentrasi substrat, g/L
S _{data} , S _{hitung}	: S hasil percobaan dan perhitungan
t	: waktu, jam
T ₁ , T ₂	: suhu reaksi, °C
X	: konsentrasi sel, g/L
X _{data} , X _{hitung}	: X hasil percobaan dan perhitungan
Y _{x/s}	: yield, gram sel terbentuk per gram substrat dikonsumsi
Y _{p/s}	: yield, gram produk terbentuk per gram substrat dikonsumsi
Y _{obs}	: yield teramat g sel/g substrat
μ	: laju pertumbuhan spesifik, 1/jam
μ_m	: laju pertumbuhan spesifik maksimum, 1/jam

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, M., 1977, "Introduction to Soil Microbiology", 2 ed., pp. 149-156, John Wiley and Sons, New York.
- Bailey, J.E. and Ollis, D.F., 1986, "Biochemical Engineering Fundamentals", 2 ed., pp. 5, 396, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- Benfield, L.D., and Randall, C.W., 1980, "Biological Process Design for Wastewater Treatment", pp. 30, 265, Prentice-Hall, Inc., Englewood.
- Brauer, H., 1985, "Fundamentals of Biochemical Engineering", Biotechnology, vol. 2, pp. 246-254, Deerfield Beach.
- Emejaiwe, S.O., Ogunbi, O., and Sanni, S.O., 1981, "Global Impacts of Applied Microbiology", pp. 266, 277-278, Academic Pres, Ltd., London.
- Palmisano, A.C. and Barlaz, M.A., 1996, "Microbiology of Solid Waste", pp. 117, 39-44, 97, CRC Press, Inc., Florida.